

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES PUZOLÁNICAS DE LAS ROCAS VOLCÁNICAS DEL MONTE BASILÉ, REPÚBLICA DE GUINEA ECUATORIAL, Y SUS APLICACIONES COMO PUZOLANAS PARA LA SUSTITUCIÓN DEL CEMENTO EN LAS MEZCLAS DE MORTEROS.

Jorge Luis Costafreda Mustelier¹; Carlos Leyva Rodríguez²; Alberto Ramos Millán¹, José Luis parra y Alfaro¹ y Benjamín Calvo Pérez¹

1 Doctor Ingeniero Geólogo. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (costafreda@yahoo.es).

2 Doctor Ingeniero Geólogo. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. Las Coloradas. Provincia Holguín. Cuba (carlosalberto582000@yahoo.es).

1 Doctor Ingeniero de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (alberto.ramos@upm.es).

1 Doctor Ingeniero de Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (joseluis.parra@upm.es).

1 Doctor Ingeniero de Minas y Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Calle de Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid (91 3367069) (benjamín.calvo.perez@gmail.com).

RESUMEN

Las rocas efusivas formadas por la actividad volcánica del volcán Basilé constituyen la principal fuente de áridos naturales de la Isla de Bioko, en Guinea Ecuatorial. El auge alcanzado por la construcción en la ciudad de Malabo, Malabo II y Malabo III, son un testimonio concluyente del volumen de áridos empleado para erigir los nuevos polígonos, urbanizaciones, infraestructura portuaria, carreteras, presas, alcantarillados y paseos marítimos.

Gran parte de los materiales de construcción, fundamentalmente el cemento, procede de las importaciones, mientras que las rocas y minerales industriales autóctonos se conocen poco, opacados por el papel hegemónico del petróleo y el gas natural.

El desconocimiento casi absoluto de las propiedades químicas, petrográficas y mecánicas de estas rocas, y la existencia de un sistema normativo pobre, ha provocado su uso indiscriminado y una controvertida calidad en la elaboración de los productos finales. Asimismo, la falta de experiencia en ingeniería y geotecnia para el desarrollo de minas y canteras, y la intermitencia de una ley de minas poco consolidada, ha favorecido la germinación indiscriminada de un gran número de excavaciones, propensas a continuos derrumbes y a la producción de impactos medioambientales irreversibles.

La presente contribución científica se ha marcado como objetivo mostrar los resultados obtenidos del análisis y caracterización de estas formaciones volcánicas, así como su posible aprovechamiento industrial mediante el aporte de datos sobre sus propiedades puzolánicas e idoneidad en la elaboración de morteros.

Los datos indican que estas rocas eruptivas, fundamentalmente escorias y flujos de lavas de composición basáltica, son capaces de sustituir al cemento pórtland normal hasta en un 25%, favoreciendo el incremento de las resistencias mecánicas normales con valores que sobrepasan los 37 Mpa a 28 días. El análisis de las muestras mediante el método de la puzolanicidad a 7 días dejó establecido el carácter puzolánico de estas rocas, que fue corroborado por la interpretación de citados ensayos mecánicos.

El estudio de la composición química detectó contenidos en SiO_2 (44,40%), Al_2O_3 (15,58%), CaO (9,32%), MgO (4,25%) y Fe_2O_3 (13,63%), y cantidades despreciables de azufre, sulfatos y materia orgánica.

Los análisis de difracción de rayos x revelaron la presencia mayoritaria de una fase compuesta por feldespato, y una fase subordinada constituida por cuarzo, hematita y dolomita. El estudio mediante microscopía electrónica de barrido permitió comprobar la ausencia casi total de las especies vítreas.

Los resultados que se presentan en este trabajo, podrían devenir en información útil para el posible emplazamiento de una fábrica de cemento puzolánico en la Isla de Bioko; la actual fábrica *Abayak*, única en Guinea Ecuatorial, y que se encuentra situada en la parte continental del país, no aporta suficiente producción para las demandas cada vez mayores de la construcción.

INTRODUCCIÓN

La apertura de Guinea Ecuatorial al comercio internacional está dando sus frutos desde hace poco más de una década. El acelerado ritmo que caracteriza la relación con países desarrollados, sobre todo en materia de comercio, exige la creación de nuevas y eficaces infraestructuras internas; en este sentido, y de forma incipiente, se están dando los primeros pasos para cubrir las demandas de recursos humanos, así como la formación y capacitación de ingenieros, técnicos y operarios. Se tiene noticia sobre la implantación y modernización de laboratorios, de la fabricación y modernización de complejos portuarios y aeroportuarios, del desarrollo de las industrias locales, de proyectos de electrificación y diversificación energética, que Guinea Ecuatorial protagoniza en colaboración con otros países.

Pero, uno de los temas más importantes y que carece de la solidez y atención requeridas, es la industria de la construcción. Naturalmente, se están edificando nuevas zonas residenciales, se ha ampliado el puerto de Malabo, y están prácticamente en su fase final el adoquinado del paseo marítimo de Bata y la construcción de las urbanizaciones ministeriales de Malabo II. Sin embargo, los materiales empleados para estas construcciones proceden en su mayoría de la importación.

La fábrica de cemento Abayak importa cemento a granel que luego reenvasa en bolsas estándar, a razón de unas 900 toneladas por día, pero la capacidad de sus almacenes apenas supera las 15.000 toneladas, circunstancia que, además de encarecer el precio de venta, deviene en una producción insuficiente para cubrir el ya notable ritmo de la construcción en todo el país.

No obstante, Guinea Ecuatorial es un país rico no sólo en petróleo y gas natural, sino en recursos no metálicos que sirven como fuentes de materias primas para la construcción,

generalmente inexplorados o con un grado de estudio muy bajo. El auge de las nuevas construcciones ha abierto una brecha para la explotación indiscriminada de los áridos que se destinan a la construcción civil; el número de concesiones mineras otorgadas a las empresas constructoras crece vertiginosamente (ver tabla 1), cuyas labores ya están dejando su impronta en la morfología del paisaje natural (ver figura 1).

Tabla1: Relación de concesiones mineras adjudicadas a empresas extractoras y constructoras en Guinea Ecuatorial
(Fuente: M.M.I.E. de Guinea Ecuatorial, 2010).

NOMBRE DE LA EMPRESA	NOMBRE DE LA CANTERA
ALBARAKA S.	PATIO PÉREZ
ARAB CONTRACTORS	BANEY DÍA
	BANEY NOCHE
	SIPOPO I
	SIPOPO II DÍA
	SIPOPO II NOCHE
BOUYGUES BATIMENT	FINCA CARLOTA
	SAMPAKA
	KM. 34
CAMIGESA	KM. 34
CMEC	BANEY
HORIZON	SIPOPO
K5	PUERTO K5
RAZEL	PATIO PÉREZ
SEGUIBAT	BANEY
SOGECO	PATIO P. I
	PATIO P. II
	LUBA
	SIPOPO
	MOKA
	REBOLA KM. 13
	FINCA ALEGRE
	RIABA INASA
	RIABA VIKATANA
	TIMBABE
SOMAGEC	KM. 34

No se tiene conocimiento sobre la metodología de trabajo que siguen estas empresas extractoras de áridos, ni los análisis y ensayos a que se someten las materias primas.

El desconocimiento de la calidad de los áridos provoca serias patologías en las construcciones de Malabo, sobre todo aquellas que tienen que ver con las construcciones particulares, donde el poco conocimiento de los materiales lleva a los artesanos y albañiles a elaborar bloques, morteros y hormigones carentes de cohesión y durabilidad, afectados por las más variadas patologías (ver figura 1).



Figura 1: Detalles de la explotación de áridos en una cantera próxima a la ciudad de Moka, Guinea Ecuatorial. Obsérvese el mal desarrollo de las labores mineras y los derrumbes originados por el deficiente cálculo de la estabilidad de los taludes (Fotografía: J.L. Costafreda, 2012).

El estudio científico que se presenta a continuación ha aportado resultados importantes, a juicio de los propios autores, que demuestran, a través de ensayos y análisis de los materiales volcánicos de la Isla de Bioko, y con el empleo de laboratorios de prestigio y con acreditación reconocida en el ámbito europeo, la calidad de estos materiales.

Para esta investigación, se muestrearon los afloramientos de rocas volcánicas ubicados en las inmediaciones de la ciudad de *Luba* y *Moka* (ver figura 2), y se seleccionaron dos muestras representativas: *Moka-1* (N: 3° 23' 32.7''; E: 8° 39' 33.6'') y *Moka-1 A* (N: 3° 23' 35.9''; E: 8° 39' 31.9'') (ver figura 3).



Figura 2: Mapa esquemático de ubicación de los puntos de muestreo en las inmediaciones de las ciudades de *Luba* y *Moka*, en Guinea Ecuatorial (Fuente: www.google.com).



Figura 3: Detalles de las operaciones de muestreo en un afloramiento de rocas volcánicas en la localidad de *Moka*, Guinea Ecuatorial (Fotografía: J.L. Costafreda, 2012).

Metodología empleada para la determinación de la calidad de las rocas volcánicas y sus aplicaciones como puzolanas para la sustitución del cemento en las mezclas de morteros.

Estudio granulométrico:

El estudio de las fracciones granulométricas (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006) de las dos muestras analizadas detectó poblaciones mayoritarias en el *huso* 1,0 mm – 0,080 mm, aunque las máximas retenciones han tenido lugar en el intervalo granulométrico de 0,50 mm – 0,16 mm (ver figura 4).

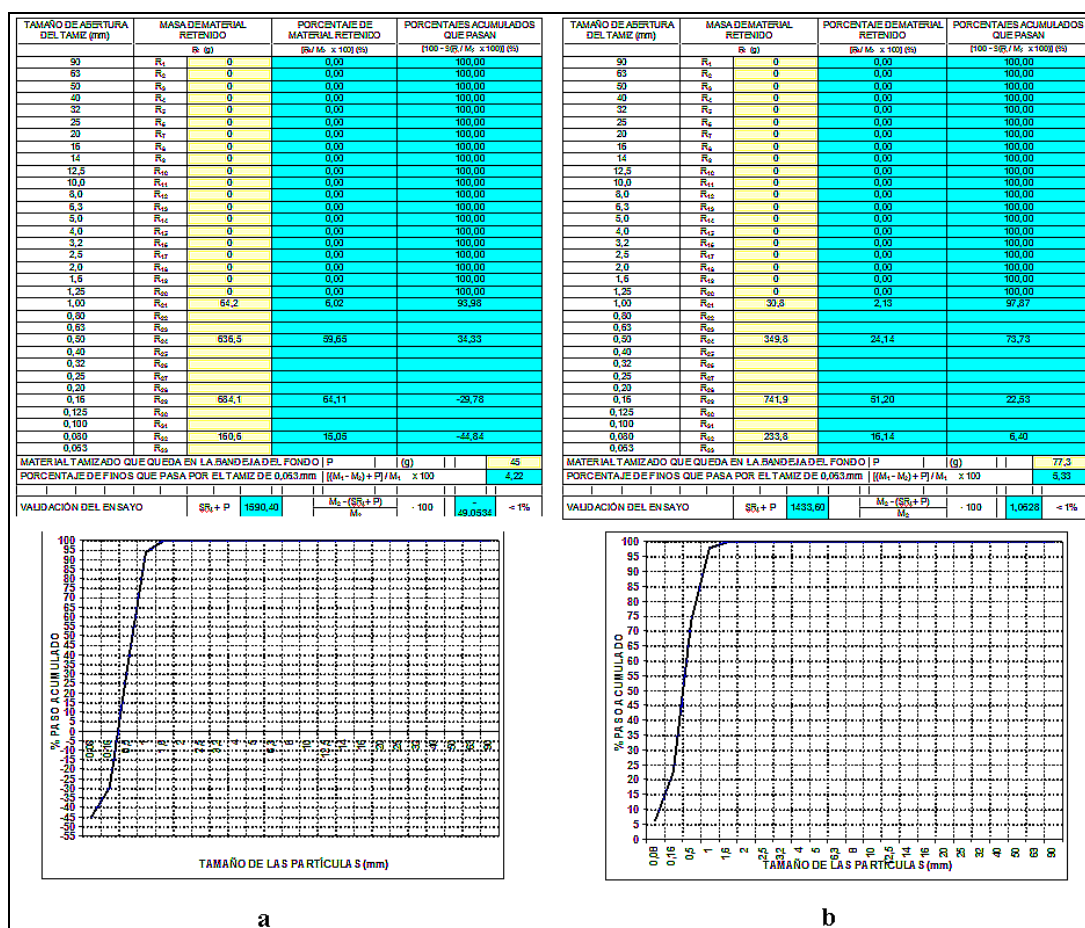


Figura 4: representación de las variaciones granulométricas obtenidas del estudio de las muestras *Moka-I* y *Moka-1 A* (UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006).

Como puede observarse, las curvas obtenidas en cada caso acusan una evidente similitud, que indica el parentesco petrogenético de ambas muestras.

El análisis culminó con la obtención de fracciones pasantes por el tamiz de 0,063 mm, que fueron destinadas a sucesivos ensayos.

Contenido en humus:

La determinación de los contenidos en humus, se llevó a efecto siguiendo las indicaciones de la norma europea UNE-EN 1744-1:2010. Las muestras fueron sometidas a secado (55°C) durante veinticuatro horas consecutivas, y, posteriormente, se mezclaron con una disolución de hidróxido de sodio con concentración del 3%.

La posterior comparación de color de la mezcla con una disolución patrón, demostró que las muestras carecen de compuestos orgánicos nocivos.

Difracción de rayos x:

Los resultados de los análisis por difracción de rayos x de las muestras *Moka 1* y *Moka 1 A*, revelan la presencia de una fase mayoritaria compuesta por feldespato ($d\text{\AA} = 3,20$, $2\Theta = 27.770$ e $I/\text{Máx} = 100\%$), con visible albitización (Ab: 71% -An: 19%) (ver figura 5). Esta alteración pudo tener un carácter local, relacionado con el autometasomatismo de la propia lava.

Las fases subordinadas corresponden a cuarzo, hematita y dolomita.

La presencia de dolomita y hematita, específicamente en estas muestras, también puede ser un indicativo de cierto efecto hidrotermal que afectó a estas formaciones volcánicas.

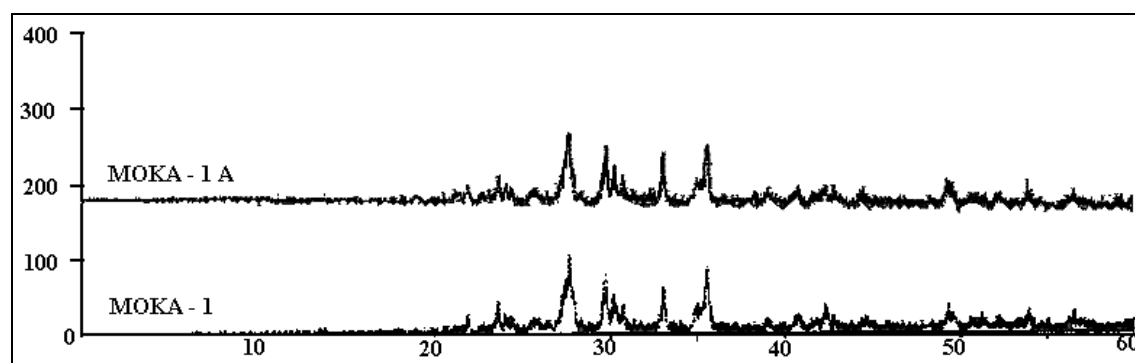


Figura 5: Representación de los difractogramas a partir del análisis de las muestras *Moka-1* y *Moka-1 A* mediante difracción por rayos x.

Microscopía electrónica de barrido:

El análisis de la muestra *Moka - 1* con el microscopio electrónico permitió disponer de microfotografías que muestran una típica escoria volcánica de composición básica, con carácter prácticamente criptocristalino, con grandes vesículas vacías y de gran permeabilidad, testimonio del rápido escape de los gases. Presenta bordes irregulares, indicando que la lava estaba aún en ebullición cuando alcanzó la superficie (ver figura 6).

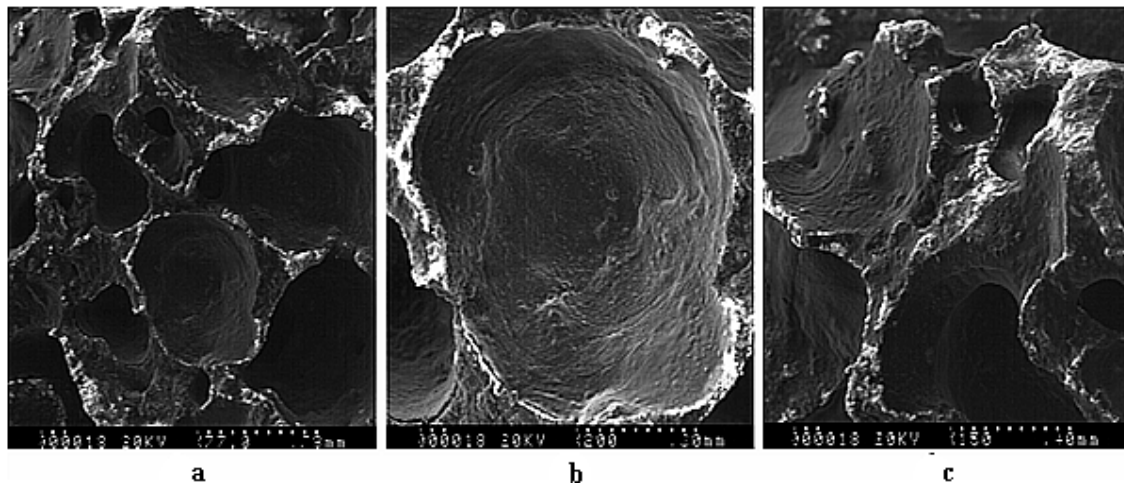


Figura 6: Microfotografías (a, b y c) de la muestra Moka-1 con diferentes aumentos mostrando detalles de las estructuras de las lavas de la localidad de Moka.

Las microfotografías (*a*, *b* y *c*) de la muestra *Moka-1 A* permiten describir una roca volcánica con aspecto escoriáceo, con desarrollo de vesículas alargadas que indican el movimiento de la lava en las etapas previas a su enfriamiento (ver figura 7).

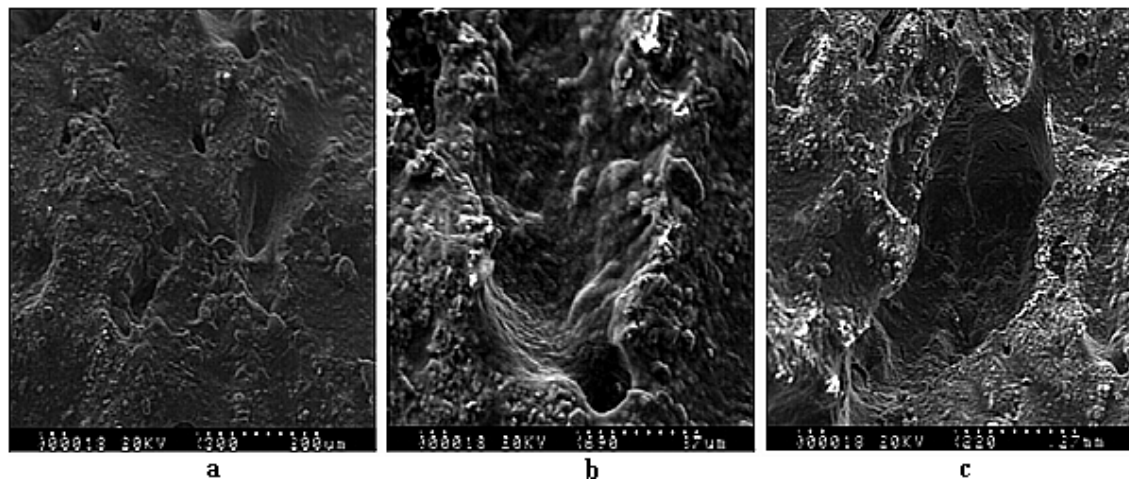


Figura 7: Microfotografías tomadas con el microscopio electrónico donde se observan detalles de la micromorfología de las muestras *Moka 1* y *Moka 1 A*.

En ninguna de las muestras analizadas se ha encontrado material secundario relleno de las vesículas, con lo cual podría interpretarse el carácter tardío de las erupciones que originaron estas lavas, donde no ha tenido lugar aún la formación de compuestos secundarios, como zeolitas y arcillas.

La microscopia electrónica de barrido tampoco detectó la presencia de especies vítreas, ni frescas ni desvitrificadas, lo que da pie para que pueda interpretarse la petrogénesis de estas rocas como productos de una lava basáltica sumamente fluida, cuyo calor intrínseco no se perdió bruscamente, sino de forma gradual, dando lugar a la formación de pequeños cristales (microlitos). De este modo, no se dieron las condiciones para que se formara la fase vítrea, por tanto, las muestras analizadas están constituidas mayormente por fases cristalinas (44,39-44,40% de SiO_2), de las cuales sólo el 15,64-15,6% es reactiva (ver tabla 2). Esta es una de las razones por la cual los materiales volcánicos de la localidad de *Moka* poseen puzolanicidad moderada.

Análisis químicos:

Los resultados de los análisis químicos ubican a estas rocas extrusivas entre los productos de categoría media para ser añadidos como agregados al clinker de los cementos puzolánicos; es decir, la actividad de la sílice reactiva está por debajo del 25% (UNE-EN 196-2:2006) en las dos muestras analizadas. No obstante, el cálculo de la relación $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO})$ (*Moka 1*: 3,8% y *Moka 1 A*: 3,5%) arrojó valores que las ubican justamente en el límite (3,5%), incluso por encima de éste, que marca la citada norma (ver tabla 2).

La discreta reactividad de la componente silícea (*SiO₂ reactiva*) de estas muestras (15,64% - *Moka 1*- y 15,68% -*Moka 1 A*-) (ver tabla 2) no debe considerarse como una incapacidad de estos materiales para desarrollar reactividad hidráulica con el cemento en presencia de agua; al contrario, indican que su reacción tiene un carácter *lento* en el tiempo, pero con tendencia a la reactivación cuando se alcanzan periodos cercanos a los 28 días (Costafreda, J.L., 2008). Esto se corrobora con los resultados obtenidos a partir de los análisis de la puzolanidad a 7 días (UNE-EN 196-5: 2001), según los cuales, estas muestras son puzolánicas; aunque exhiben, respecto a la curva isotérmica de solubilidad a 40 °C, los valores más bajos de concentración en iones hidroxilo y en óxido de calcio (ver figura 8).

Tabla 2: Resultados de los análisis químicos arrojados por las muestras *Moka-1* y *Moka-1 A* (UNE-EN 196-2:2006).

MUESTRAS:	MOKA 1	MOKA 1 A
DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS:	(%)	
SiO ₂ TOTAL	44,40	44,39
MgO	4,22	4,25
CaO TOTAL	9,32	9,30
Fe ₂ O ₃	13,63	13,63
Al ₂ O ₃	15,58	15,53
SiO ₂ REACTIVA	15,64	15,68
CaO REACTIVA	9,24	9,21
R.I.	54,91	54,88
SiO ₂ /(CaO + MgO)	3,8	3,5

Análisis químico de puzolanidad:

Durante la ejecución de los análisis químicos de puzolanidad, se testaron otras puzolanas a fin de establecer una comparación razonada con las muestras *Moka 1* y *Moka 1 A*, llegándose a la conclusión de que estas últimas son las que poseen menor reactividad puzolánica, para un período de 7 días (ver figura 8). Existe una lógica coincidencia entre este hecho y la evidencia que ofrecen los resultados de la composición química detallados en la tabla 2, donde los contenidos en compuestos reactivos de *Moka 1* y *Moka 1 A* son sensiblemente bajos, respecto a los determinados en las otras muestras.

La duración de los ensayos de puzolanidad comprende un período normalizado de 7 días (UNE-EN 196-5: 2001), sin embargo, las muestras pueden testarse después de un período más prolongado (15 días); este detalle, podría tenerse en cuenta, a manera de recomendación, para seguir ensayando las rocas volcánicas de la localidad de *Moka*, con la seguridad de que sus propiedades puzolánicas podrían acentuarse con el transcurso del tiempo.

Tabla 3: Resultados de los análisis químicos de puzolanicidad para las muestras *Moka-1* y *Moka 1 A*.

MUESTRA: MOKA - 1				MUESTRA: MOKA - 1 A			
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO				DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS IONES HIDROXILO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN HCL 0,1 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	1,023	29,70	60,8	1	1,023	29,0	61,6
DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO				DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN ÓXIDO DE CALCIO			
DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l	DETERMINACIÓN	FACTOR	VOLUMEN EDTA 0,030 M (ml)	CONCENTRACIÓN Mmol/l
1	0,985	11,77	7,0	1	0,985	11,80	6,6
RESULTADOS				RESULTADOS			
DÍAS			PUZOLÁNICO	DÍAS			PUZOLÁNICO
7			SI	7			SI

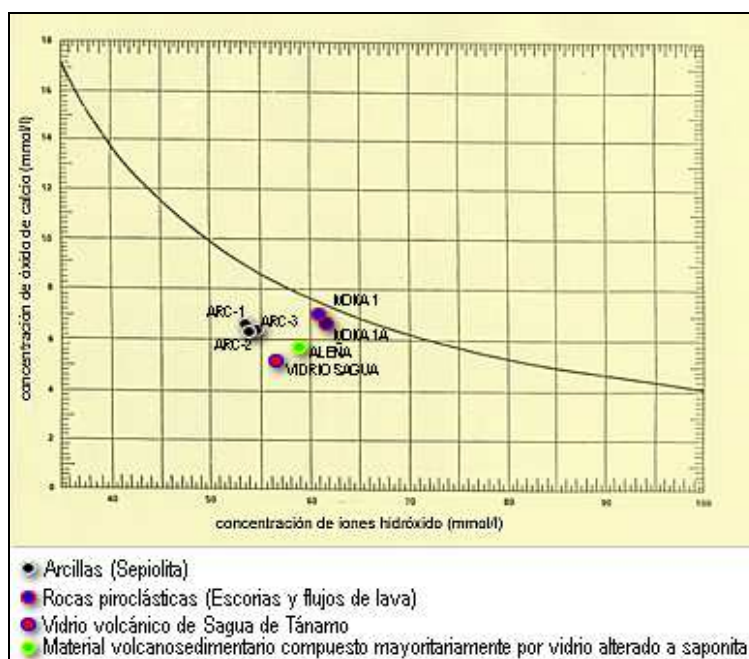


Figura 8: Diagrama de *Frattini* representando gráficamente el comportamiento puzolánico de las muestras *Moka 1* y *Moka 1 A*, en relación con otras puzolanas procedentes de Guinea Ecuatorial y de Cuba.

De acuerdo con la interpretación de los resultados que aparecen en las tabla 3 y en la figura 8, las muestras *Moka 1* y *Moka 1 A* poseen reactividad puzolánica frente al $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tiempos de fraguado y estabilidad de volumen:

Para la evaluación de la calidad y posible aplicación de las rocas volcánicas de Guinea Ecuatorial se llevó a cabo el estudio de los tiempos de principio y final de fraguado, así como la determinación de posibles expansiones de la masa del mortero elaborado con parte de estas puzolanas, en un régimen de humedad relativa del 67,9% y temperatura ambiental cercana a los 19,1 °C (UNE-EN 196-3:1996). La tabla 4 ofrece una información detallada sobre los resultados obtenidos.

Tabla 4: Resultados de los ensayos físicos para la determinación de los tiempos de inicio y final de fraguados, así como la estabilidad de volumen de las masas de morteros elaborados con puzolanas de Guinea Ecuatorial (UNE-EN 196-3:1996).

MUESTRA	HORA (h)	AGUA (%)	FRAGUADOS			ESTABILIDAD DE VOLUMEN / EXPANSIVIDAD	
			PRINCIPIO (horas)	FINAL (horas)	TOTAL (minutos)	AGUJAS (mm)	
MOKA I	8:40	123	11:35	12:10	PF 175min	1	0.0mm
					FF 210min	2	
						3	0.0mm
MOKA I A	12:42	123	15:37	16:12	PF 175min	1	0.0mm
					FF 210min	2	
						3	0.0mm

(PF): Principio de fraguado.

(FF): Final de fraguado.

Los tiempos de inicio y final de fraguado son mayores que los calculados para un cemento pórtland normal, provocado por la naturaleza y el comportamiento de los materiales puzolánicos empleados en este ensayo. Para un cemento pórtland normal, el *tiempo de fraguado inicial* varía entre 1 y 4 horas, aproximadamente, mientras que el *tiempo de fraguado final* se desarrolla entre las 3 y las 7 horas.

No se determinaron valores positivos en el estudio de la estabilidad de volumen, por lo que se concluye que las mezclas elaboradas con las muestras *Moka I* y *Moka I A* son estables, y no producen expansividad ni retracción.

La norma UNE EN 196-1:2005 señala como válidos los valores de expansividad menores o iguales que 10 milímetros, y tiempos de inicio de fraguados que superen los 75 minutos. De acuerdo con estas aseveraciones, los resultados presentados en este epígrafe son positivos.

Determinación de la consistencia del mortero fresco:

Para la realización de este ensayo se fabricaron tres tipos de mezclas de morteros en condiciones ambientales normalizadas (*Temperatura ambiental*: 19,9 °C; *humedad relativa*: 76,8% y *temperatura del agua*: 18,6 °C) (UNE-EN 1015-3).

Muestra patrón: comprende el 100% del cemento pórtland, con las correspondientes cantidades de arena normalizada y agua destilada.

Muestras Moka I y Moka I A: constituyen las mezclas mixtas de cemento pórtland (75%) y de puzolanas (25%), además de las porciones normalizadas de agua y arena.

En todos los ensayos de consistencia la densidad aparente del mortero fresco es mayor de 1200 Kg/m³ por lo que, según la norma UNE-EN 1015-3, el valor del escurrimiento debe ser 175 ±5 mm.

La tabla 5 muestra con sumo detalle los elementos de los morteros mixtos así como del patrón, e incluye, además, los resultados del escurrimiento mediante el empleo del método de *sacudidas* (UNE-EN 1015-3).

Según los resultados, los morteros frescos, elaborados con las muestras *Moka I* y *Moka I A*, poseen una adecuada consistencia, que les da el carácter de mezclas con buena *trabajabilidad*.

Tabla 5: Detalles de la dosificación de los tres tipos de muestras de morteros para la determinación de la consistencia en estado fresco. Se aportan los detalles sobre el peso de la arena normalizada y el valor del diámetro del escurrimiento mediante *sacudidas* (UNE-EN 1015-3).

DOSIFICACIÓN DEL MORTERO		PESO DE LA ARENA (g)	DIÁMETRO DE ESCURRIMIENTO (mm)	
1	100% Cemento Pórtland + Arena Normalizada + 225 g de Agua Destilada (<i>Muestra Patrón</i>)	1348.6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 180
			Diámetro 2: 180	
2	75% Cemento Pórtland + 25% Puzolana (<i>MOKA 1</i>) + Arena Normalizada + 230 g de Agua Destilada.	1349.4	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 182.5
			Diámetro 2: 185	
3	75% Cemento Pórtland + 25% Puzolana (<i>MOKA 1 A</i>) + Arena Normalizada + 225 g de Agua Destilada.	1348.6	Diámetro 1: 180	Diámetro medio 177.5
			Diámetro 2: 175	

Resistencias mecánicas:

Los diseños de mezclas descritos en el epígrafe anterior, fueron empleados también en la elaboración de probetas para obtener informaciones relativas al comportamiento mecánico de morteros elaborados con las muestras *Moka 1* y *Moka 1 A*.

En este estudio se prescindió del cálculo de las resistencias iniciales a 2 y 7 días, y se centró en la determinación de las resistencias normales calculadas para 28 días de curado.

Tabla 6: Resultados de las resistencias mecánicas, del cálculo del índice de actividad resistente y del pesaje de las probetas, para un período de 28 días.

CEMREF	MOKA 1	MOKA 1 A
RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN (Mpa)		
A 28 DÍAS		
46,1	37,6	34,7
ÍNDICE DE ACTIVIDAD RESISTENTE (%)		
-	81,6	75,3
PESO DE LAS PROBETAS (A 24 HORAS)		
588,8	595,2	599,2
591,2	596,7	600,8
591,8	597,0	601,3
(A 28 DÍAS)		
596,5	601,2	602,8
596,1	602,0	604,3
593,8	601,7	604,8

Según la tabla 6, las resistencias mecánicas de los morteros diseñados con este tipo de puzolana no igualaron ni superaron a las obtenidas para el mortero patrón, sin embargo, los valores encajan dentro de los límites mínimos y máximos ($\geq 32,5$ - $\leq 52,5$) que impone la norma UNE EN 196-1:2005 a los cementos con resistencia inicial normal (32,5 N- 32,5 R).

Los resultados obtenidos con el cálculo del índice de actividad resistente (*Moka 1*: 81,6% y *Moka 1 A*: 75,3%), en relación con la resistencia de la probeta patrón, aportan un carácter cuantitativo y cualitativo a estas muestras (ver tabla 6 y figura 9).

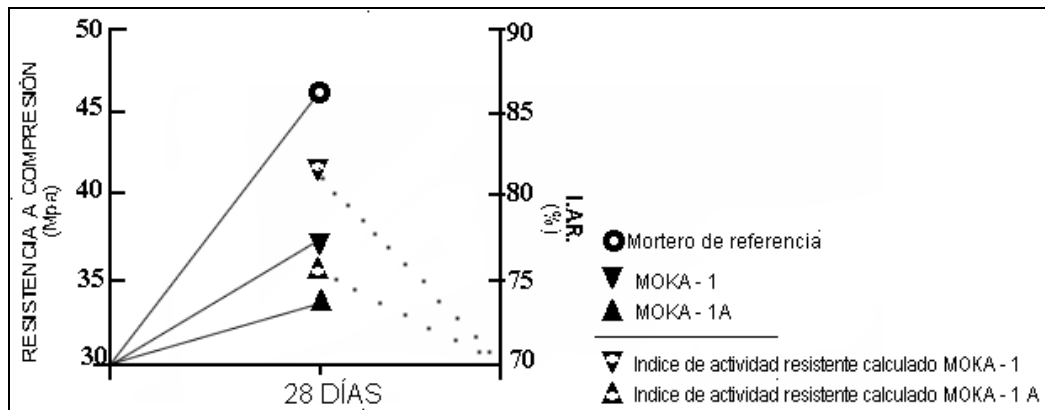


Figura 9: Evolución de las resistencias mecánicas normales y comportamiento del índice de actividad resistentes.

Los resultados mecánicos responden fielmente a las características intrínsecas de las rocas volcánicas ensayadas en esta investigación. Desde el punto de vista de su composición química, menos de la mitad de la sílice que contienen estos materiales es reactiva. Esta pequeña cantidad de sílice junto al 15,58% de la alúmina, que representan la fase ácida (ver tabla 2), no es suficiente para contrarrestar el efecto de los compuestos alcalinos y alcalino-térreos con sensible abundancia en estas muestras, por lo que las reacciones hidráulicas se tornan lentas y tardías. Esta es también la causa por la cual los resultados del ensayo de puzolanicidad y el índice de actividad resistente dieron los más bajos valores, en comparación con otras muestras.

Por último, se debe insistir en que lo expuesto no menoscaba el valor de las rocas volcánicas de Moka como puzolanas, antes bien, se podría argumentar que su comportamiento está dentro de las propiedades normales que caracterizan a cualquier puzolana.

CONCLUSIONES

El análisis y la interpretación de los resultados obtenidos permiten concluir que las rocas volcánicas originadas durante las erupciones del volcán *Basilé*, así como las de los centros de emisión de Bioko Sur (*Luba* y *Moka*), son puzolánicas.

El empleo más efectivo de estos materiales ha de ser con granulometrías por debajo de las 63 micras, a fin de obtener superficies activas más efectivas, ya que el porcentaje de sílice activa resulta ser bajo. No se recomienda trabajar con granulometrías más gruesas, debido a que las reacciones hidráulicas son muy lentas en períodos cortos (por debajo de los 28 días), lo que puede acarrear fenómenos de friabilidad y poca cohesión en los elementos del hormigón y del mortero, tan usual en muchas de las construcciones artesanales de Guinea Ecuatorial.

Estos materiales podrían emplearse para sustituir parte de los cementos comunes (25-30%) a gran escala, porque, en primer lugar, constituyen un recurso muy abundante en ese país, y, en segundo, porque aportan sensibles mejoras a las mezclas, como la disminución del calor de hidratación, de la expansividad-retracción, entre otras. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estas rocas volcánicas, como puzolanas que son, imprimen buenas resistencias a los morteros y hormigones, pero de forma gradual y lenta, necesitando un período óptimo de 28 días como mínimo.

El máximo aprovechamiento de estos recursos podría mejorarse si se dosificaran conjuntamente con las arcillas sepiolíticas recientemente estudiadas e investigadas por los autores de este trabajo, las cuales poseen una elevada reactividad puzolánicas y resistencias mecánicas por encima de los 48 Mpa a 28 días. La mezcla de ambos productos podría llevarse a cabo mediante un sencillo sistema de condicionamiento y dosificación, aprovechando las ventajas que ofrece la proximidad de los yacimientos, tanto a puerto como a los posibles lugares de emplazamiento de las plantas de tratamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Bayliss, P., Erd, D.C., Mrose, M. E., Sabina, A. P. y Smith, D. K. (1986). Mineral powder diffraction file data book. *International Centre for Diffraction Data*. 16-1184 pp.

Costafreda, J.L. (2008). Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid. 515 p.

EN-1744-1:2010. Determinación del contenido en humus.

UNE-EN 196-1:2005. Determinación de las resistencias mecánicas.

UNE-EN 196-2:2006 // UNE 80225:1993 EX // UNE EN 451-1:2006. Análisis químico de cementos.

UNE-EN 933-1:1998 y A1:2006. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.